中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1135−1144

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160080

外来调水对华北低平原区地表水和地下水水化学特征的影响*

——以河北省南皮县为例

孔晓乐[1,2] 王仕琴[1**] 刘丙霞[1] 孙宏勇[1]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 华北低平原区有着巨大的粮食增产潜力，同时也是粮食生产和农业水资源矛盾突出的地区。外来调水与浅层微咸水的联合利用是解决区域水资源问题的有效途径之一，同时也将引起区域水循环和水环境的改变。为明确外来调水对华北低平原区地表水和地下水水化学特征的影响，本研究在华北低平原区河北省南皮县域内对调水后不同季节地表水和地下水进行调查和采样，利用水文地球化学和氢氧(δ^2H、$\delta^{18}O$)稳定同位素相结合的方法，研究外来调水对地表水和地下水转化及其水化学特征的影响。研究结果表明，11 月至翌年 7 月，受蒸发作用的影响，地表水电导率(EC)和钠吸附比(SAR)增加，δ^2H、$\delta^{18}O$ 同位素不断富集；由于地表水和周围土壤的交换吸附作用使其水化学类型向 Na^+、Cl^-和 SO_4^{2-}增加、HCO_3^-减少的咸水转变。调水改变了地表水和浅层地下水之间的补给关系，11 月至翌年 3 月，沟渠附近浅层地下水受外来调水直接或者灌溉补给，使得 3 月浅层地下水 EC 降低，埋深变浅，部分采样点分布在外来调水的 SAR-EC 区域。受调水影响，3 月沟渠附近浅层地下水水化学类型为 $Na\cdot Mg\cdot Ca\text{-}Cl\cdot SO_4$、$Na\cdot Mg\text{-}Cl\cdot SO_4\cdot HCO_3$、$Na\cdot Mg\text{-}SO_4\cdot Cl\cdot HCO_3$ 等，是 11 月调水($Na\cdot Mg\cdot Ca\text{-}SO_4\cdot HCO_3\cdot Cl$)和浅层地下水($Na\cdot Mg\text{-}Cl\cdot SO_4$)的过渡类型。3 月至 7 月浅层地下水补给沟渠水，地下水埋深变深，7 月浅层地下水水化学类型与 3 月相似。调水可以季节性地改善区域内沟渠水及其附近的浅层地下水水质，而对深层地下水和坑塘水的水质无改善作用。调水对沟渠水水质的改善体现在调水季节，对浅层地下水水质的改善存在滞后性，2014 年 11 月调水之后，2015 年 3 月浅层地下水的水质得到改善。因此，采用调水和浅层地下水、坑塘水混合灌溉，对合理开发利用区域咸淡水资源以及深层地下水压采，恢复地下水位意义重大。

关键词 调水 水化学特征 水质 地表水–地下水转化 华北低平原区 南皮县
中图分类号: P933 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1135-10

Effect of water diversion on hydro-chemical characteristics of surface water and groundwater in lowland area of the North China Plain: A case study of Nanpi County, Hebei Province*

KONG Xiaole[1,2], WANG Shiqin[1**], LIU Bingxia[1], SUN Hongyong[1]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The great grain yield potential of the lowland area of North China Plain have been compromised by regional

* 中国科学院百人计划项目和国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02)资助
** 通讯作者: 王仕琴，主要研究方向为水文循环和地下水环境。E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn
孔晓乐，主要研究方向为包气带水盐运移机理和地表水–地下水交换机理。E-mail: xlkong@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2016–01–20 接受日期: 2016–04–12

* The study was supported by the 100-Talent Project of Chinese Academy of Sciences and the National Key Technologies R & D Program of China (2013BAD05B02).
** Corresponding author, E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn
Received Jan. 20, 2016; accepted Apr. 12, 2016

contradiction between water resources and agricultural production. The combined use of brackish shallow groundwater and diversion water is an effective way to address the regional water issue, which will certainly change the regional water cycle and environment. This study took different seasonal investigations in Nov. 2014, Mar. and Jun. in 2015 after water diversion in Nanpi County, which is located in the lowland area of North China Plain. The effects of water diversion on hydro-chemical characteristics of surface water and groundwater were determined using hydro-geochemical analysis and stable isotopes. The results showed that evaporation increased electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR) and enrichment of δ^2H and $\delta^{18}O$ isotopes in surface water. Soil sorption and exchange increased Na^+, Cl^- and SO_4^{2-}, but decreased HCO_3^- in surface water, thereby increasing the water salinity in the region. Water diversion changed the interaction between surface water and groundwater. From November to March of the following year, diversion water recharged shallow groundwater near water division channels through directly percolation or irrigation. This decreased EC and depth of shallow groundwater at certain sampling points distributed along the diversion channel. In March 2015, the shallow groundwater types were $Na{\cdot}Mg{\cdot}Ca\text{-}Cl{\cdot}SO_4$, $Na{\cdot}Mg\text{-}Cl{\cdot}SO_4{\cdot}HCO_3$ and $Na{\cdot}Mg\text{-}SO_4{\cdot}Cl{\cdot}HCO_3$, which was as a result of mixing of diversion water ($Na{\cdot}Mg{\cdot}Ca\text{-}SO_4{\cdot}HCO_3{\cdot}Cl$) with shallow groundwater ($Na{\cdot}Mg\text{-}Cl{\cdot}SO_4$) in November 2014. Shallow groundwater recharged channel water in March to July, which decreased groundwater depth. The shallow groundwater type in March was similar to that in July. Water diversion seasonally improved the quality of channel water and shallow groundwater in the vicinity. However, water diversion had no effect on deep groundwater and pool water quality. Water division improved channel water quality immediately after division. However, there was a time lag between diversion operation and shallow groundwater quality improvement. The quality of shallow groundwater improved in March 2015 due to water division in November 2014. Therefore, the combined use of shallow groundwater, division water and pool water for irrigation was critical for the rational development and utilization of both brackish water and freshwater resources, reduction of groundwater exploitation and recovery of deep groundwater level in the study area.
Keywords Water diversion; Hydro-geochemical characteristics; Water quality; Groundwater-surface water interaction; Lowland area of North China Plain; Nanpi County

不断增长的人口对粮食的需求量不断增加，预计到 2050 年农业产量需求量将翻倍[1]。我国政府提出到 2020 年实现粮食增产 500 亿 kg，环渤海低平原中低产田区有盐碱荒地 67 万 hm^2，是重要的后备耕地资源，有着巨大的粮食增产潜力[2]。位于华北中东部的低平原区，浅层含水层多微咸水分布，开发利用程度低；农业灌溉导致对深层地下水的过量开采，已经造成中东部平原区形成以天津、河北沧州和衡水为中心的复合型地下水超采漏斗群[3−6]。为了缓解华北平原水资源危机和深层地下水超采引起的环境问题，2014 年 6 月河北省制定了深层地下水压采限采规划，其中位于华北中东部低平原区的沧州市为主要的压采限采区。压采措施的提出无疑给该区域水资源的利用提出了挑战。为解决低平原区水资源问题，一方面正在逐步加强浅层微咸水的利用力度，如郭凯等[7]采取冬季咸水结冰灌溉技术，提高了对区域内矿化度较高的浅层地下水的利用程度；李佳等[8]研究了河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值。另一方面跨流域调水对于缓解华北低平原区地下水超采引起的一系列环境问题有着重要作用。通过“南水北调”东线工程引入的黄河水和长江水，将引起该区域农业用水转向浅层微咸水和当地雨水、地表水和外来引调地表水等多水源联合利用的模式，同时减少深层地下水的开采。

研究区南皮县位于河北省沧州市南部，区域内土壤主要是 Cl^-或 Cl^-和 SO_4^{2-}-Na^+、Mg^{2+}混合型盐化潮土，沿剖面上下多成 T 字型分布，表层含盐量比较高，50 cm 以下土层基本稳定[9]。区域地下水位埋深较浅，为 1~5 m，在干旱季节地下水对作物有一定的补偿作用[10]；水循环主要以垂直方向上的入渗、蒸发和蒸腾的方式存在[11]。

针对华北低平原区地下水埋深较浅易受地表水影响、流动性弱且更新能力较差[4]的情况，外来调水应用于农业灌溉将改变原有的水循环模式和水环境，研究华北低平原受水区地表水和地下水的转换关系以及调水对水化学特征的影响对水资源合理开发利用具有重要意义。很多学者针对跨流域调水对受水区水循环和水质的影响展开了一系列研究。赵世新等[12]通过三维水力调配和水质模型，并经实测值验证，结果证明：调水可以改善受水区地表水水质状况。柳强[13]对黄河三角洲农业区引黄河水灌溉生态调水对地表水与地下水交换机制影响的研究结果表明：调水和当地的地下水混合并参与区域内水循环影响地下水的水位和水化学特征。

“引黄济沧工程”是南水北调的一部分，2014年“引黄济沧”通过潘庄线路分两次共调引黄河水3.4亿m^3，9月一期0.5亿m^3调水调入大浪淀供给城市生活用水，10—11月的二期调水1.9亿m^3入大浪淀等水库供给

城市生活用水, 1亿m^3为农业用水[14]。南皮县是农业调水的主要受水区, 也是“渤海粮仓”项目县域粮食增产的主要示范区。本文以华北低平原区农业调水典型的受水区——河北省南皮县的地表水和地下水为研究对象, 以氢氧同位素为手段研究区域内地表水和地下水转化关系, 并在此基础上, 结合水文地球化学和数理统计的方法分析调水对区域地表水和地下水水化学特征的影响, 为合理开发利用区域咸淡水资源以及防止水环境恶化提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区处于内陆平原与滨海平原过渡地区, 属黄河、海河冲积平原(图 1), 为暖温带半干旱半湿润季风气候, 光照资源充足, 年最高气温 31 ℃, 年最低气温–19 ℃, ≥19 ℃的年平均积温 4 300 ℃, 年平均日照时数 2 318 h。降水年际和年内变化很大, 多年(1954—2010 年)平均降水量为 572.5 mm, 降水年内分布不均, 6—8 月降水约占全年总降水量的 73.6%[9–10]。

区域有 4 个地下含水层(图 2), 第Ⅰ、Ⅱ含水层组为咸水和微咸水, 开发利用程度低; 第Ⅲ、Ⅳ含水层组为淡水, 是区域内工农业生产的主要水源[4]。区域内有发达的地表水系统, 除大运河、漳卫新河、宣惠河和四港新河 4 条主要的河流和集水区大浪淀外, 还包括大浪淀的 5 条引水渠(一、二、三、四、

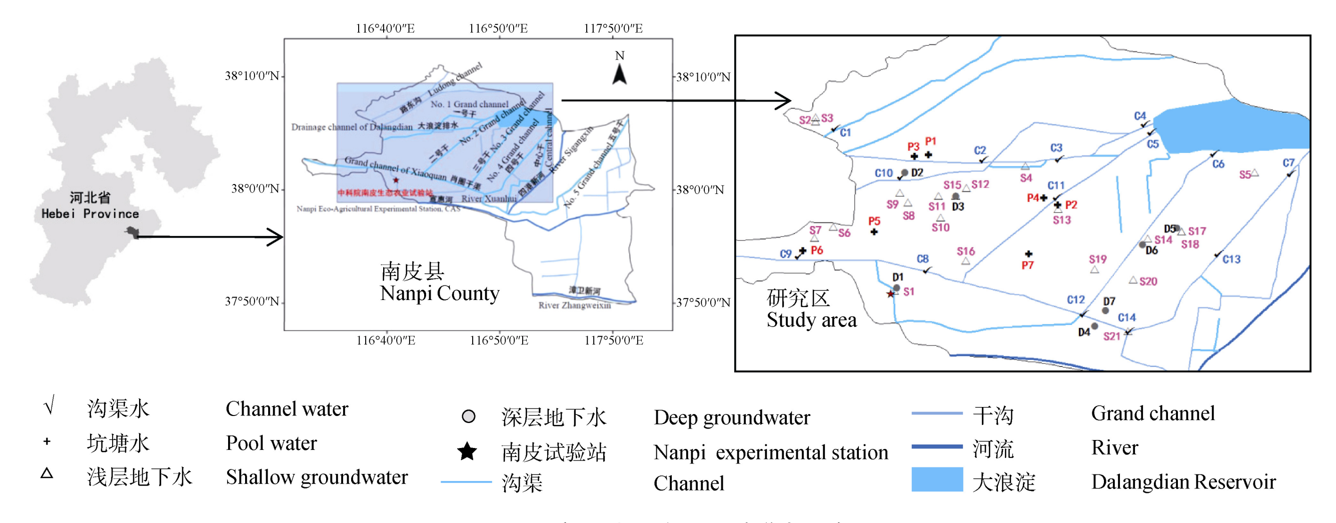


图 1　研究区地理位置和采样点分布图

Fig. 1　Location of the study area in Nanpi County and sampling points

C: 沟渠水; P: 坑塘水; S: 浅层地下水; D: 深层地下水。C: channel water; P: pool water; S: shallow groundwater; D: deep groundwater.

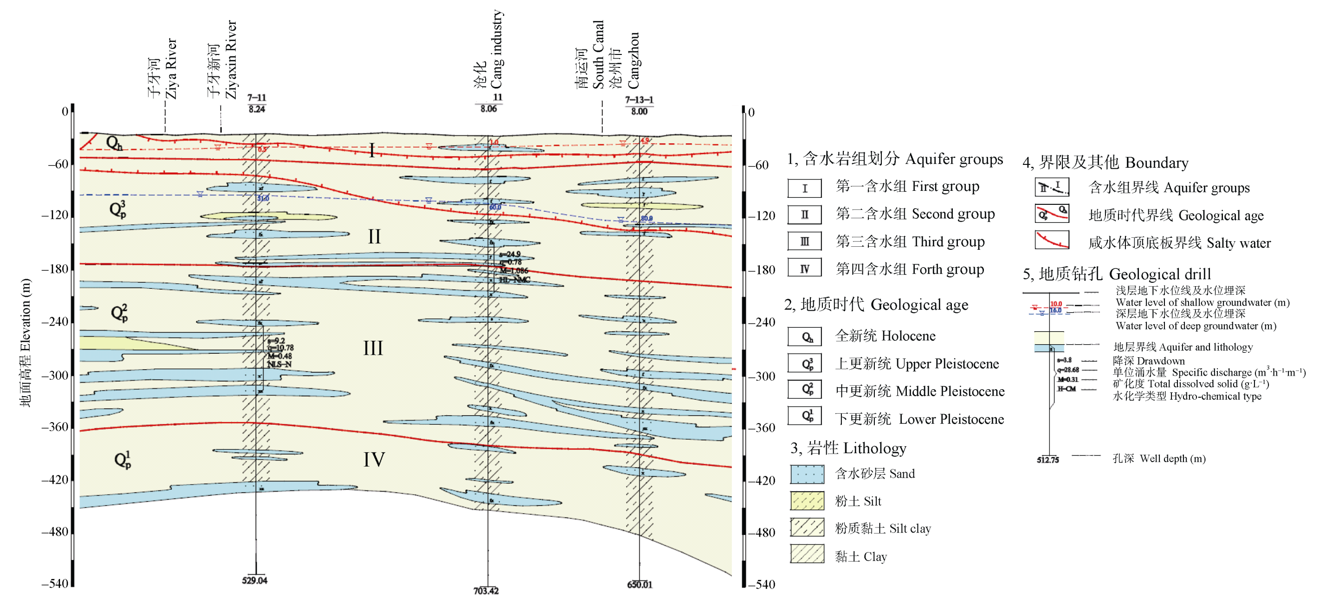


图 2　区域水文地质剖面[根据张兆吉等[4]绘制]

Fig. 2　Hydrogeology cross-section in the study area (modified according to Zhang et al.[4])

五号干渠)、大浪淀排水、肖圈干渠和路东沟等主要的排水沟渠(图 1)。农业外来调水首先经南运河进入肖圈干渠，然后再通过大浪淀的 4 条引水渠输水供给农业灌溉。2014 年 11 月至 2015 年 7 月采样期间区域内无二次农业调水。在采样期间，共进行了 3 次灌溉，分别为：2014 年 11 月小麦灌溉，水源主要为深层地下水和外来调水，引水沟渠附近的农田采用沟渠水进行灌溉，距离沟渠水较远的农田采用深层地下水进行灌溉；3 月小麦灌溉和 7 月上旬玉米灌溉以深层地下水为主要的灌溉水源。

1.2 样品的采集和分析

本研究以大浪淀引水渠地表水及其周边地下水为研究对象，分别于 2014 年 11 月、2015 年 3 月和 7 月针对宣惠河以北、四号干渠以西的区域沿主要干沟和河流进行实地调查和水样采集(图 1)，采样包括浅层地下水、深层地下水、沟渠水和坑塘水。现场调查浅层地下水水埋深，采用便携式 pH 计(pH/ORP/DO METER D-75, HORIBAR Scientific，日本)现场测定 pH，电导率仪(COND METER ES-71, HORIBAR Scientific，日本)现场测定电导率(EC)。地下水采样前先抽水 3 min 左右，然后用 50 mL 和 100 mL 的塑料瓶采集水样装满并密封带回实验室，放于 4 ℃冰箱保存，一周之内完成分析工作。水化学和同位素分析均在中国科学院农业水资源重点实验室进行，水样 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-采用液相离子色谱(ICS-2100, Dionex，美国)分析，HCO_3^-和 CO_3^{2-}采用双指示剂滴定法测定，所有水样进行阴阳离子平衡验证，保证可信的误差范围在±5%以内。δ^2H、$\delta^{18}O$ 采用液态水稳定性同位素分析仪(L2120-i Isotopic H_2O; Picarro 美国)进行测定，δ^2H、$\delta^{18}O$ 采用 VSMOW 标准，其中 δ^2H 的分析精度为±0.5‰、$\delta^{18}O$ 的分析精度为±0.2‰。

2 结果与分析

2.1 地表水和地下水理化性质

表 1 为研究区地表水和地下水水化学参数统计值。从中可知，区域地表水和地下水呈碱性，其中深层地下水和沟渠水 pH 季节变化不明显，而 2014 年 11 月至翌年 7 月浅层地下水和坑塘水 pH 平均值增加。不同水体 pH 变化规律：2014 年 11 月为浅层地下水(7.43)<坑塘水(8.24)<深层地下水(8.25)<沟渠水(8.33)，2015 年 3 月为浅层地下水(7.57)<沟渠水(8.35)<深层地下水(8.41)<坑塘水(8.54)，2015 年 7 月为浅层地下水(7.60)<深层地下水(8.43)=沟渠水(8.43)<坑塘水(8.94)。区域内地表水和地下水 EC 值呈现不同的季节变化规律，深层地下水 EC 平均值最小，且不同季节变化小(1 369~1 417 $\mu S \cdot cm^{-1}$)；2014 年 11 月至翌年 3 月浅层地下水 EC 平均值减小，2015 年 3 月至 7 月增加，2014 年 11 月和翌年 7 月 EC 值接近；坑塘水 EC 平均值呈现出与浅层地下水相反的变化规律；2014 年 11 月至翌年 7 月沟渠水 EC 平均值增加，增幅为 4 520 $\mu S \cdot cm^{-1}$。不同水体 EC 平均值的季节变化规律具体为：2014 年 11 月深层地下水(1 417 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<沟渠水(1 623 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<坑塘水(4 125 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<浅层地下水(4 173 $\mu S \cdot cm^{-1}$)，2015 年 3 月深层地下水(1 403 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<沟渠水(3 606 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<浅层地下水(3 863 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<坑塘水(4 846 $\mu S \cdot cm^{-1}$)，2015 年 7 月深层地下水(1 369 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<浅层地下水(4 167 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<坑塘水(4 700 $\mu S \cdot cm^{-1}$)<沟渠水(6 143 $\mu S \cdot cm^{-1}$)。结合当地的水文地质条件[4]和野外调查情况可知，低平原区地下水埋深较浅，地表水和地下水交换迅速，EC 值较低的外来调水参与区域水循环，可降低区域内地表水和浅层地下水的矿化度，因此不同季节不同水体 EC 值之间的差异可揭示它们之间来源和补给关系。

表 1 研究区地表水和地下水水化学参数统计值

Table 1 Statistics of hydro-geochemical parameters of surface water and groundwater in the study area

时间(年-月) Time (year-month)	参数 Parameter	沟渠水 Channel water	坑塘水 Pool water	浅层地下水 Shallow groundwater	深层地下水 Deep groundwater
2014-11	pH	8.33±0.31	8.24±0.63	7.43±0.35	8.25±0.51
	EC ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	1 623±847	4 125±290	4 173±2 285	1 417±148
2015-03	pH	8.35±0.32	8.54±0.51	7.57±0.33	8.41±0.16
	EC ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	3 606±1 759	4 846±1 818	3 863±1 473	1 403±131
2015-07	pH	8.43±0.64	8.94±0.64	7.60±0.34	8.43±0.40
	EC ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	6 143±5 732	4 700±1 755	4 167±1 585	1 369±52
	采样数 Sampling number	14	2(7)	21	7

2014 年 11 月坑塘水采样点为 2 个，其余采样季节为 7 个；其他水体不同季节取样数量一致。The pool water sample number was 2 in November 2014, and it was 7 in the other sampling periods. Sample numbers of the other water bodies were same in different sampling periods.

δ^2H、δ^{18}O 同位素是不同水体之间补给关系的示踪剂[15]，表 2 为不同季节地表水和地下水 δ^2H 和 δ^{18}O 同位素值统计特征。从表中可知，受地表水体蒸发作用的影响，地表水体 δ^2H、δ^{18}O 同位素值大于地下水体，且表现出随季节变化的趋势，而不同季节地下水 δ^2H、δ^{18}O 同位素值变化不大。不同水体 δ^2H、δ^{18}O 同位素季节变化为：坑塘水>沟渠水>浅层地下水>深层地下水。

表 2　研究区不同季节地表水和地下水 δ^2H 和 δ^{18}O 同位素值统计特征

Table 2　δ^2H and δ^{18}O distribution characteristics of surface water and groundwater in different seasons in the study area　‰

时间(年-月) Time (year-month)	参数 Parameter	沟渠水 Channel water	坑塘水 Pool water	浅层地下水 Shallow groundwater	深层地下水 Deep groundwater
2014-11	δ^{18}O	−7.8±0.7	−6.7±1.5	−7.9±1.2	−10.4±0.2
	δ^2H	−57.5±3.4	−54.0±6.6	−58.6±7.6	−76.3±0.8
2015-03	δ^{18}O	−6.7±1.3	−5.6±3.6	−7.8±1.6	−10.8±0.1
	δ^2H	−53.0±8.2	−48.7±19.4	−57.6±8.9	−77.5±0.3
2015-07	δ^{18}O	−5.7±1.9	−3.2±4.0	−8.3±0.9	−10.8±0.3
	δ^2H	−50.2±8.7	−36.4±21.7	−60.4±5.5	−77.2±0.5

2.2　地表水和地下水的补给关系

由于地表水和地下水属于同一资源的两个互相联系的成分，它们对彼此的水量和水质相互影响[16]。明确地表水和地下水相互转化关系，对于区域水资源的开发利用和管理非常重要。图 3 为地表水和地下水 δ^2H-δ^{18}O 同位素关系，从中可知，深层地下水 δ^2H、δ^{18}O 同位素分布范围与地表水和浅层地下水相差很大。徐彦泽[17]通过格陵兰冰芯同位素值，结合当地水文地质条件和历史地理状况，认为沧州市深层地下水(井深 300~450 m, δ^2H 范围为−76‰~−72‰, δ^{18}O 范围为−10.7‰~−10.1‰)是晚更新世冰期古水补给；浅层地下水(井深 10~50 m, δ^2H 范围为−69‰~−59‰, δ^{18}O 范围为−9.6‰~−8.2‰)主要为全新世黄河河水补给。陈宗宇[18]提出了华北平原浅层地下水和深层地下水同位素分布的范围，分别与本次研究中浅层深层地下水的 δ^2H 和 δ^{18}O 同位素值的范围一致，结合水文地质条件(图 2)，可以认为深层地下水与浅层地下水无水力联系。因此，本区域内深层地下水和浅层地下水来源不同，且无水力交换关系。

与深层地下水不同，浅层地下水同位素和部分地表水范围接近，这说明地表水和浅层地下水之间水力交换密切。强烈的蒸发作用使得地表水同位素富集，同位素相对富集的地表水对浅层地下水的补给使得浅层地下水的同位素相对富集，和部分地表水同位素值分布范围接近。同时部分地表水同位素值远远大于地下水体，也体现了一定的蒸发特征。坑塘附近的浅层地下水同位素值与坑塘水接近(δ^2H 分布范围为−48.9‰~−46.8‰, δ^{18}O 分布范围为−5.9‰~−5.6‰)，但大于其他浅层地下水同位素值，可以证明坑塘附近浅层地下水受坑塘水的补给(S20)。

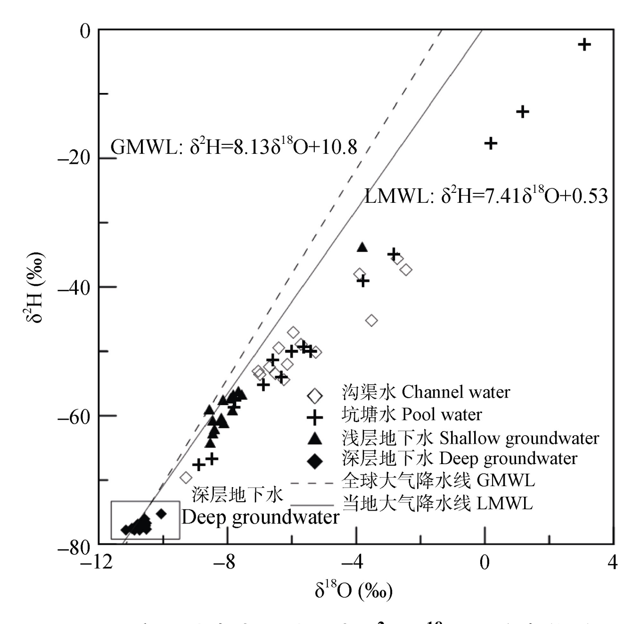


图 3　研究区地表水和地下水 δ^2H-δ^{18}O 同位素关系
(全球大气降水线参考文献[19]绘制，当地大气降水线参考文献[11]绘制)

Fig. 3　Relationship between δ^2H and δ^{18}O isotope of surface water and groundwater in the study area [the global meteoric water line (GMWL) and the local meteoric water line (LMWL) are drawn according to the references [19] and [11], respectively.]

同位素关系证明地表水体和浅层地下水之间有着密切的水力联系[15]，却无法证明不同季节地表水和浅层地下水之间的补给关系。浅层地下水埋深的季节变化是地表水和地下水补给关系的一个重要反映[20]。因此，可以通过浅层地下水埋深的季节变化，判定不同季节地表水和地下水之间的补给关系。图 4 为部分采样点浅层地下水埋深，从中可知，除 S16 外，2014 年 11 月至翌年 3 月，地下水埋深变浅，2015 年 3 月至 7 月地下水埋深变深。地下水埋深还呈现出与沟渠距离相关的空间变化特征，受沟渠直接补

给和灌溉回渗的影响，沟渠附近浅层地下水埋深变动幅度较大；随着距离的增加，沟渠水的影响作用变小，浅层地下水埋深变动幅度逐渐减小。2014 年 11 月至翌年 3 月期间降水很少，且浅层地下埋深变浅(图 4)，这与以往水文地质监测数据中该时间段地下埋深持续下降的变动趋势相反[17]。由此，可以判定浅层地下水埋深变浅是外来调水直接补给和灌溉补给的结果。2015 年 3 月至 7 月间，随着沟渠水量减少，沟渠附近的浅层地下水补给沟渠水，导致其埋深加深。S16 采样点地下水埋深的持续下降与该点工业废水的季节排放有关，该点工业废水直接通过暗管排向浅层地下水，随着排污的停止及浅层地下水流的扩散使得该采样点地下水位持续下降。

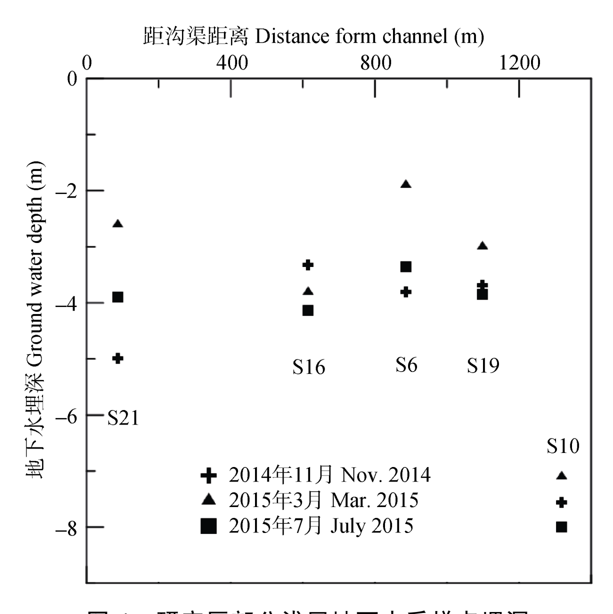


图 4 研究区部分浅层地下水采样点埋深

Fig. 4 Shallow groundwater depth of part sampling points in the study area

综上所述，2015 年 11 月至翌年 3 月沟渠附近外来调水直接或灌溉补给浅层地下水，2015 年 3 月至 7 月沟渠附近的浅层地下水补给沟渠水。远离沟渠的浅层地下水受沟渠影响作用较小，因此在本文中针对这部分地表水和地下水的补给关系不作为讨论重点。

2.3 调水对区域地表水和地下水水化学特征的影响

以往的研究结果表明：外调水与地下水的混合作用可改善地下水水质[21]，同时地下水流在运动过程中与周围环境的相互作用导致其水化学特征发生变化[22]。由于区域内坑塘水不接受外来调水，且大部分坑塘距离沟渠较远，因此坑塘水可代表区域内未受调水影响的地表水；而外来调水直接进入沟渠，因此沟渠水尤其是调水起点的沟渠水可以代表调水的水化学特征，而地表水对地下水的补给存在时间滞后性，因此2011年11月浅层地下水可代表未受地表水补给的地下水水化学特征。由于外调水与区域内水资源水化学特征的差异，外调水引入受水区参与水循环后，对受水区不同水体的水化学特征产生影响。由于外调水仅存在沟渠中，因此本文主要讨论沟渠水和浅层地下水的水化学特征变化。为明确调水对区域地表水–地下水水化学特征的影响，采用Piper图分析沟渠水和浅层地下水的水化学特征变化。

图5为研究区不同季节地表水和地下水Piper图。由图可知，外来调水水化学特征呈现季节性变化。沟渠水水化学类型呈现出随水流变化的特征，外调水源输入点(C1、C9和C10)水化学类型为Na·Mg·Ca-SO_4·HCO_3·Cl，在水流方向的终点(C4、C5、C6和C7)水化学类型为Na·Mg-SO_4·Cl(图5a箭头方向)。浅层地下水水化学类型复杂，且季节变化大。2014年11月不同采样点水化学类型差异较大(图5a)。受调水补给作用的影响，2015年3月沟渠附近浅层地下水集中分布在图5b中的区域1，水化学类型为Na·Mg·Ca-Cl·SO_4、Na·Mg-Cl·SO_4·HCO_3、Na·Mg-SO_4·Cl·HCO_3等，是浅层地下水(Na·Mg-Cl·SO_4)和外调水(Na·Mg·Ca-SO_4·HCO_3·Cl)之间过渡类型(图5b)。这证明调水对2014年11月至翌年3月间沟渠附近的浅层地下水水质具有明显的改善作用。2015年3月至7月由于不受外调水补给，浅层地下水水化学类型变化不大。2014年11月至翌年7月，由于蒸发作用以及与周围土壤的相互作用，地表水水化学类型向以Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}增加，HCO_3^-减少的咸水转变(图5c箭头方向)。图5c中不同箭头也显示出不同采样点沟渠水水质变化的不一致性，证明沟渠水水质的改变与其周围的环境密切相关。

水化学类型的改变除了与地表水和地下水转化关系有关外，还受水动力条件的影响[23]。不同水动力分区内地下水化学类型的形成，主要与碳酸盐、硫酸盐、硅酸盐等矿物的溶解及蒸发浓缩作用有关。通过Gibbs图可以定性地判断区域岩石、大气降水、蒸发浓缩作用对地下水水化学的影响。Gibbs图解法将水体划分为降水控制型、风化控制型和蒸发/结晶控制型[24]。在Gibbs图中，横坐标代表水体中阳离子$Na^+/(Na^++Ca^{2+})$或阴离子$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$的比值；纵坐标代表水体中溶解性总固体。图6为地表水和地下水Gibbs图，从图6a可知，采样点均落在$Na^+/(Na^++Ca^{2+})$比值大于0.5的范围内，阳离子以Na^+为主，水化学类型受蒸发浓缩影响。部分采样点阴离子分布

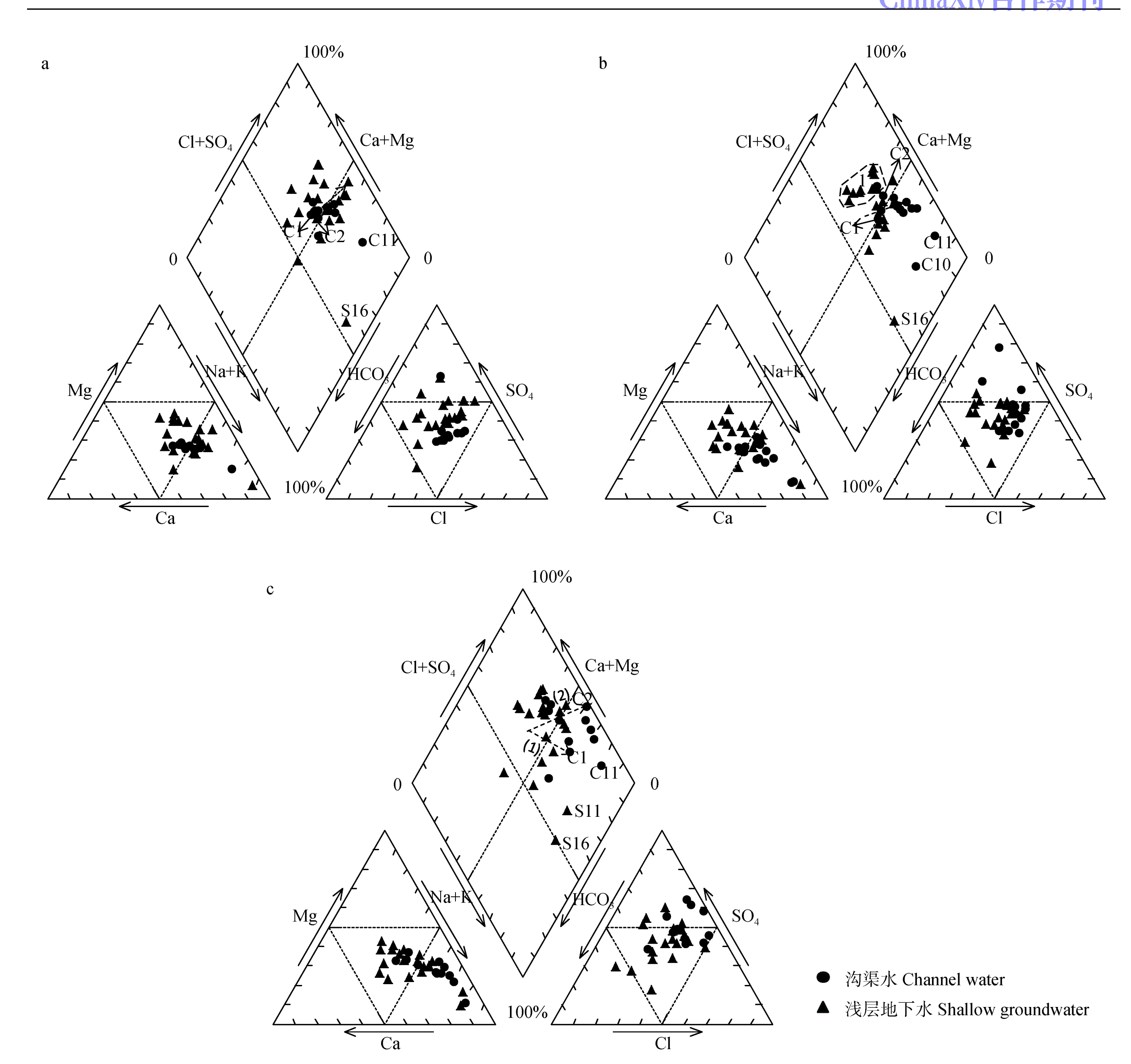


图 5　研究区沟渠水和浅层地下水 Piper 图(a: 2014 年 11 月; b: 2015 年 3 月; c: 2015 年 7 月)

Fig. 5　Distribution of the channel water and shallow groundwater samples from the study area in Piper diagrams (a: November, 2014; b: March, 2015; c: July, 2015)

在$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$比值小于0.5的范围内，阴离子以HCO_3^-为主，水化学类型受岩石风化影响；部分分布在$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$比值大于0.5的范围内，阴离子以Cl^-为主，水化学类型受岩石风化和蒸发浓缩共同影响。阴阳离子之间控制作用的不一致性，主要与水体和土壤中离子交换吸附有关。水中大量的Na^+通过交换吸附作用，使得吸附在黏土矿物上的Ca^{2+}和Mg^{2+}进入水体，反应过程如下[23,25]:

$$4Na^++Ca\text{–}X_2+Mg\text{–}X_2\rightarrow 4Na\text{–}X_2+Ca^{2+}+Mg^{2+} \quad (1)$$

其中X为黏土矿物。

所有的深层地下水采样点落在$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$比值小于0.5的范围内(图6b)，其离子成分主要来源于岩石。2014年11月外调沟渠水分布在$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$比值小于0.5的范围内，其离子成分主要受岩石风化的影响，这主要和外来调水的发源地和流经区域环境有关。2014年11月至翌年7月沟渠水和坑塘水呈现TDS、$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$和$Na^+/(Na^++Ca^{2+})$比值增加的趋势，其不仅体现了地表水受蒸发浓缩影响，同时体现出了离子的交换吸附作用。2014年11月至翌年3月，浅层地下水部分采样点由受蒸发浓缩影响区域转移到受岩石风化影响区域，证实了外来调水对地下水的补给作用，3月至7月向相反的方向转移，证明了蒸发作用是该时期地下水的主要影响因素。浅层地下水TDS大于地表水也体现出地表水在补给地下水过程中的蒸发浓缩作用。

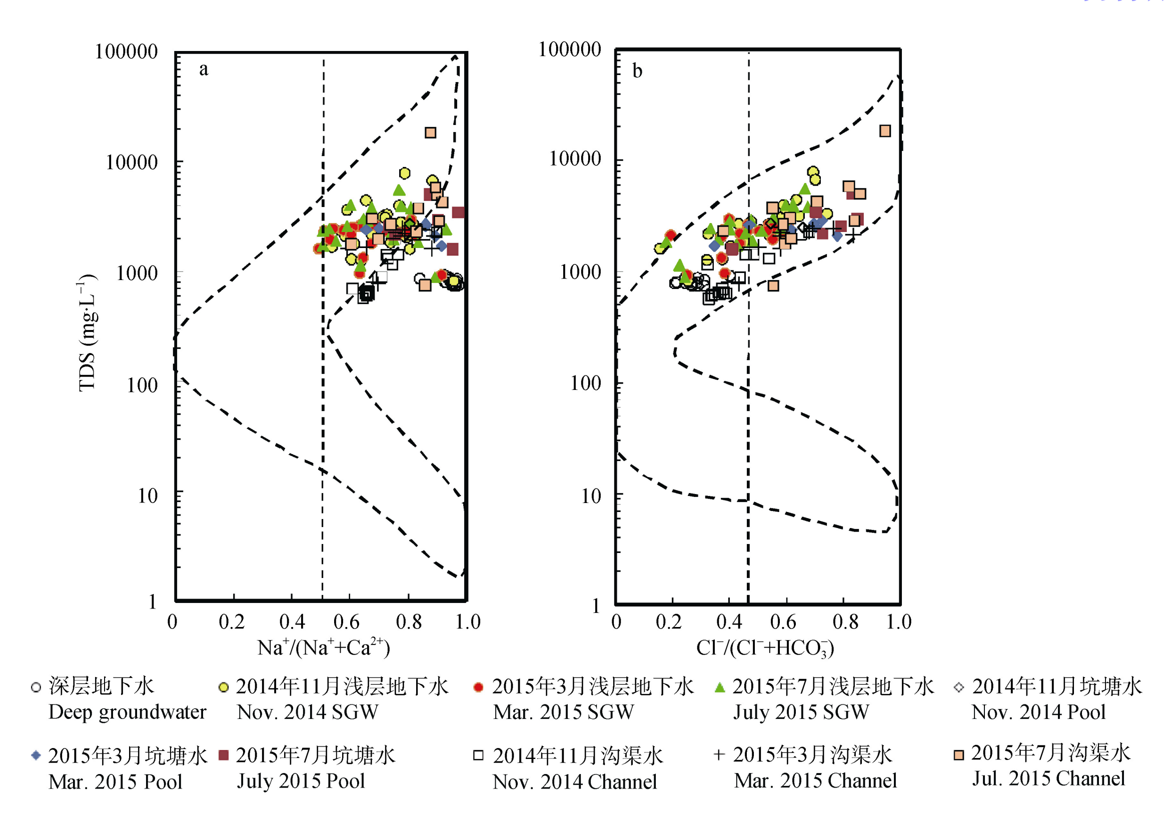


图 6　研究区不同时间地表水(a)和地下水(b) Gibbs 图[根据 Gibbs[24]绘制]

Fig. 6　Gibbs diagrams of surface water (a) and groundwater (b) of the study area in different times (modified according to Gibbs[24])

2.4　调水对区域地下水水质的影响

外来调水改变受水区水循环关系，同时也会引起区域内水体水质的变化[13]。为评价外来调水对区域灌溉水质的影响，采用钠吸附比(SAR)和EC之间的关系对灌溉水进行分级[26]。图7为灌溉水水质分类图，由图可知2014年11月沟渠水分为3部分，调水起点处外调沟渠水，分布在C3–S1区域(图7a 1区)；调水沟渠终点处的外调沟渠水分布在C3–S2和C4–S2区域(图7a 2区)；未受调水影响的沟渠水分布在C4–S3和C4–S4区域(图7a 3区)。外调沟渠水在流动的过程中存在着EC和SAR增加的趋势，从图7a中的1区转到2区，水质恶化。受持续蒸发和与周围河道交换吸附作用的影响，2015年3月沟渠水较2014年11月EC和SAR增加，且比未调水之前的沟渠水更大，部分采样点已经达到了未受调水影响的3区。受6月降雨和蒸发的共同影响，2015年7月沟渠水体现出了与采样点周围环境密切相关的特征。受降雨影响部分沟渠水分布在C4–S2和C4–S3的区域，显示出降雨对沟渠水水质的改善作用。

图7b为不同季节坑塘水水质分类图。由图可知，受蒸发作用的影响，2014年11月至翌年3月坑塘水呈现SAR和EC值增加的趋势，2015年3月至7月不同采样点由于受到采样点周围环境的影响呈现出不同的变化规律。P3和P5采样点EC值变化不大，SAR升高，体现出了交换吸附的特征；P6采样点由于受到深层地下水灌溉过程中的渗漏补给，呈现SAR升高，EC值降低的趋势；P4和P7呈现出SAR和EC值均升高的趋势，证明蒸发和交换吸附作用是影响这两个坑塘水采样点的主要原因。

图7c为不同季节浅层地下水水质分类图，由图可知，受人为暗管排污的影响，S16地下水分布在深层地下水区域(图7c 1区)，地下水EC值较低；沟渠附近的浅层地下水分布在C3–S1和C3–S2区域，为调水时期沟渠水的分布区域，证明调水对其附近地下水水质具有明显的改善作用(图7c 2区)。然而这种改善只是暂时的，在其他季节浅层地下水灌溉具有较大的盐渍化风险。图7d为不同季节深层地下水水质分类图，由图可知深层地下水水质季节变化不大，结合同位素和水文地质剖面，可明确调水对深层地下水水质无影响。

3　结论

调水改变了华北低平原区原有的地表水和地下水转化关系以及区域内灌溉水水质。2014年11月至2015年7月，受蒸发作用的影响地表水(沟渠水和坑塘水)呈现EC和SAR增加，同位素富集的趋势，由

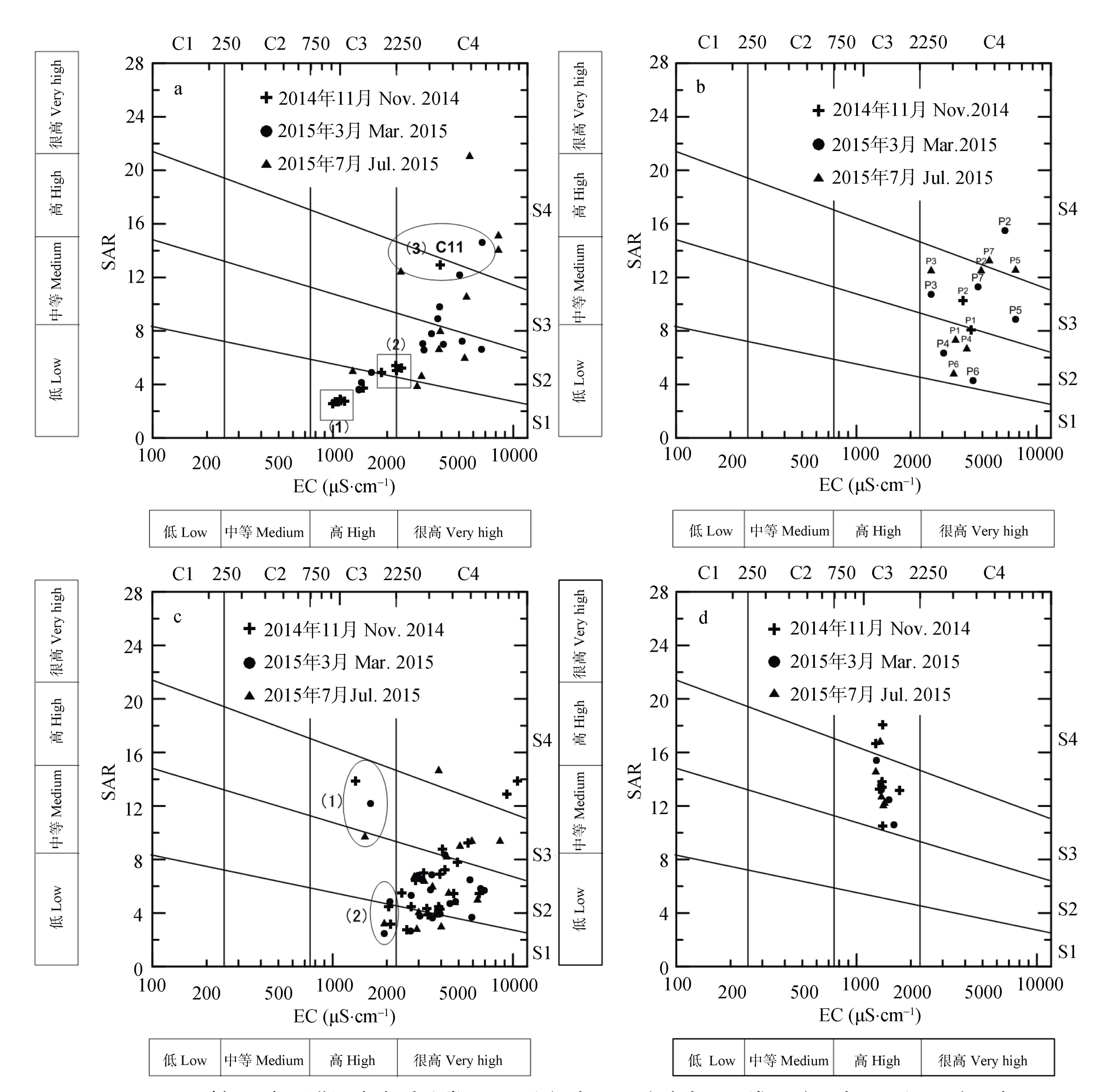


图 7　不同时间研究区灌溉水水质分类图(a: 沟渠水; b: 坑塘水; c: 浅层地下水; d: 深层地下水)

Fig. 7　Water quality classification diagrams of irrigation water of the study area in different times (a: channel water; b: pool water; c: shallow groundwater; d: deep groundwater)

于地表水和周围土壤的交换吸附作用使得地表水呈现 Na^{+}、Cl^{-}和 SO_4^{2-}增加的趋势, 地表水质不断恶化。2014 年 11 月调水后至翌年 3 月, 沟渠附近浅层地下水受外来调水直接或者灌溉补给, 浅层地下水水位埋深变浅、EC 值增势减小; 2015 年 3 月至 7 月, 随着沟渠水的减少, 浅层地下水补给沟渠水。浅层地下水和深层地下水之间无水力联系。受沟渠水和区域内浅层地下水混合作用的影响, 2015 年 3 月沟渠附近浅层地下水水化学类型为 Na·Mg·Ca-Cl·SO_4、Na·Mg-Cl·SO_4·HCO_3、Na·Mg-SO_4·Cl·HCO_3 等, 是调水 (Na·Mg·Ca-SO_4·HCO_3·Cl) 和浅层地下水 (Na·Mg-Cl·SO_4)中间的过渡类型, 同时 2015 年 3 月浅层地下水 SAR-EC 范围与 2014 年 11 月外来调水一致。外来调水为优质的淡水资源可直接用于灌溉利用, 并可暂时性地改善沟渠水水质, 在调水结束后沟渠水的水质迅速恶化, 在 3 月已经不适宜进行灌溉。沟渠水的恶化也体现在沟渠水流动的过程中, Na-Ca 交换吸附作用使得调水终点处沟渠水的水质处于可以直接灌溉利用和不能灌溉利用的边缘。区域内的坑塘水和浅层地下水具有较大的盐渍化风险, 不适宜直接进行灌溉利用; 区域内的深层地下水灌溉也存在较大的土壤 Na 化风险。因此, 采用调水、浅层地下水和坑塘水混合灌溉是该区域农业水资源综合利用和深层地下水压采恢复地下水位行之有效的措施。本研究有利于更好地认识跨流域调水条件下, 区域地下水–地表水之间的转化关系及其水化学变化特征的改变, 在此基础上采取合理的农业水利措施, 为南水北调后华北低平原区粮食保收增收提供一定的理论支持。

参考文献 References

[1] OECD. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture[R]. France: OECD, 2010

[2] 李振声, 欧阳竹, 刘小京, 等. 建设"渤海粮仓"的科学依据——需求、潜力和途径[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 371–374
Li Z S, Ouyang Z, Liu X J, et al. Scientific basis for constructing the "Bohai Sea Granary" — Demands, potential and approaches[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(4): 371–374

[3] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875–879
Liu C M. Agricultural water issues in China — Discussions on research highlights[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875−879

[4] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009
Zhang Z J, Fei Y H, Chen Z Y, et al. Investigation and Assessment of the Sustainable Use of Groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009

[5] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 890–897
Qian Y, Zhang Z J, Fei Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890−897

[6] 张改云. 沧州市深层地下水资源评价及利用对策[D]. 南京: 南京理工大学, 2007
Zhang G Y. Evaluation and utilization of deep groundwater resource in Cangzhou City[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007

[7] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 431–435
Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 431–435

[8] 李佳, 曹彩云, 郑春莲, 等. 河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 643–651
Li J, Cao C Y, Zheng C L, et al. Salinity threshold of long-term saline water irrigation for winter wheat in Hebei Lowland Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 643–651

[9] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 34–38
Qiao H L, Liu X J, Li W Q, et al. Effects of straw deep mulching on soil moisture infiltration and evaporation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 34–38

[10] 孙宏勇, 刘小京, 邵立威, 等. 不同种植模式对河北低平原区域地下水平衡和水分经济利用效率等的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 214–220
Sun H Y, Liu X J, Shao L W, et al. Effects of different cropping pattern on ground water and economic water use efficiency in the Hebei Low Plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 214–220

[11] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495–501
Wang S Q, Song X F, Xiao G Q, et al. Appliance of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 495–501

[12] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 923–931
Zhao S X, Zhang C, Gao X P, et al. The impact of the operation of eastern route project of the south-to-north water diversion project on water quality in Lake Nansi[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 923–931

[13] 柳强. 黄河三角洲农田和湿地生态系统水和土壤环境要素演变研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015
Liu Q. Evolution of environmental elements in water and soil in the agriculture and wetland ecosystems in the Yellow River Delta[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015

[14] 环球大华头条网[EB/OL]. (2015-01-05). http://tt.509.cc/a/hbxw/czrbtt/2015/0105/153144.html
Dahua global headlines network[EB/OL]. (2015-01-05). http://tt.509.cc/a/hbxw/czrbtt/2015/0105/153144.html

[15] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997

[16] Winter T C, Harvey J W, Franke O L, et al. Ground Water and Surface Water: A Single Resource[M]. Darby P A. USA: DIANE Publishing, 1998

[17] 徐彦泽. 沧州市地下水的水文地球化学与稳定同位素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009
Xu Y Z. Geochemistry and $\delta^{2}H$ and $\delta^{18}O$ stable isotopes of Cangzhou aquifer systems[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009

[18] 陈宗宇. 从华北平原地下水系统中古环境信息研究地下水资源演化[D]. 长春: 吉林大学, 2001
Chen Z Y. Groundwater resources evolution based on paleoenvironmental information from groundwater system in the North China Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2001

[19] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702–1703

[20] 陈葆仁, 洪再吉. 地下水动态及其预测[M]. 北京: 科学出版社, 1988
Chen B R, Hong Z J. Groundwater Dynamics and Prediction[M]. Beijing: Science Press, 1988

[21] 刘立才, 郑凡东, 张春义. 南水北调水源与北京地下水混合的水质变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 1–7
Liu L C, Zheng F D, Zhang C Y. Characteristics of water quality of South-to-North water diversion mixed with groundwater in Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 1–7

[22] 孙一博, 王文科, 段磊, 等. 关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 29–35
Sun Y B, Wang W K, Duan L, et al. Geochemical evolution mechanisms of shallow Groundwater in Guanzhong basin, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 29–35

[23] Appelo C A J, Postma D. Geochemistry, Groundwater and Pollution[M]. 2nd ed. Amsterdam, the Netherlands: Balkema Publisher, 2005

[24] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088–1090

[25] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995
Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. Basic Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995

[26] Richards L A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils[M]. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture Handbook, 1954